DOI: 10.5846/stxb201612222642
冯舒,赵文武,陈利顶,吕楠.2010 年来黄土高原景观生态研究进展.生态学报,2017,37(12):3957-3966.
Feng S, Zhao W W, Chen L D, Lü N.Advances in landscape ecology in the Loess Plateau since 2010 in China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(12):3957-3966.

2010 年来黄土高原景观生态研究进展

冯 舒[1,2],赵文武[3],陈利顶[1,2,*],吕 楠[1,2]
1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085
2 中国科学院大学,北京 100049
3 北京师范大学地理科学学部资源学院,北京 100875

摘要:严重的水土流失以及不合理的土地利用加剧了黄土高原土地资源的退化,导致该地区生态环境脆弱、生态系统服务不断下降。针对黄土高原地区存在的问题,我国学者基于景观生态学原理和方法,围绕"景观格局演变-驱动机制-水土流失过程-生态系统服务"的框架开展了大量研究,取得了一系列研究成果。通过梳理和总结 2010 年以来黄土高原地区景观生态学研究的现状和特点,指出了目前研究中存在的问题和不足,突出表现在区域比较研究、景观格局与生态过程耦合研究、生态服务权衡方法和模型构建等方面比较缺乏。建议未来黄土高原的景观生态学研究应加强区域尺度上的综合研究和不同地区之间的比较研究,深化景观格局演变的形成机理;进一步开展景观格局与过程的定量识别方法学研究,开发格局-过程耦合模型;加强生态系统过程与服务研究,同时开展相应的实证性研究,研发适宜的生态服务权衡模型,进而深入探讨区域生态系统服务的权衡机制。
关键词:黄土高原;景观格局;生态过程;生态恢复;生态系统服务;权衡

Advances in landscape ecology in the Loess Plateau since 2010 in China

FENG Shu[1,2], ZHAO Wenwu[3], CHEN Liding[1,2,*], LÜ Nan[1,2]
1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3 *School of Natural resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*

Abstract: The Loess Plateau plays an important role in the regional economic development in China; however, the serious issues of soil erosion, fragile ecosystem, and unreasonable land use exacerbate the degradation of land resources and decline of ecosystem services. To restore the damaged ecosystem in the Loess Plateau is of high significance in realizing the regional sustainable socio-economic development for improving the human living environment and ensuring national ecological security. In the last decade, Chinese scholars have conducted numerous studies directed towards solving the issues faced by the Loess Plateau using the landscape ecology principles including landscape pattern evolution, driving mechanism, soil erosion process, and ecosystem services. Main achievements were focused on the landscape pattern evolution and ecological environmental effects, coupling of landscape patterns and ecological processes, and tradeoff between vegetation restoration and ecosystem services. In this paper, the characteristics of landscape ecological studies in the Loess Plateau in the recent five years were reviewed, and the associated problems were analyzed. For example, the comparative study from large-scale, integrating landscape patterns and ecological processes, as well as ecosystem service tradeoff methodology are essentially required. The Chinese landscape ecologists would face the following challenges in future. First, the comprehensive studies should be strengthened on the regional-scale and among different regions, and more attention should be paid to deepen the

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41390462)
收稿日期:2016-12-22; **修订日期**:2017-02-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liding@ rcees.ac.cn

understanding of the mechanisms of formation and evolution of landscape patterns. Second, the methods for the quantitative identification of patterns and processes should be explored. Third, it is necessary to strengthen the coupling models of patterns and processes. Last, it is necessary to carry out the studies on ecosystem service and advance the corresponding empirical studies, and to develop the ecosystem service tradeoff model for exploring the tradeoff mechanisms in the regional ecosystem services.

Key Words: the Loess Plateau; landscape patterns; ecological process; ecological restoration; ecosystem services; tradeoff

自20世纪80年代以来,中国景观生态学研究在追踪国际前沿的同时,结合中国特色地区形成了自成体系的景观生态学研究[1],其研究范式经历着从"格局-过程-尺度"向"格局-过程-服务-可持续性"的变化过程[2]。黄土高原地区是我国乃至全球水土流失最为严重的地区之一。该地区地形破碎、土壤疏松、降水集中、植被退化,是典型的生态脆弱区。恢复和重建黄土高原受损的生态系统对区域社会经济发展,人民生产生活条件的改善以及国家生态安全的保障,都有着极其重要的影响[3]。为了遏制该地区生态退化,20世纪50年代和80年代,中国科学家在该地区开展了大规模综合考察,初步探讨了水土流失形成过程及其对生态环境的影响;20世纪70年代,先后在该区域设立野外长期生态观测试验站;20世纪80年代起,国家开展了以小流域为单元的水土保持综合治理工作;1999年,国家推进实施了退耕还林还草工程[4]。作为世界上独一无二的黄土高原,由于其特殊的地质地貌过程、地表水土过程和频繁的人类活动过程,该区域景观面貌发生着深刻的变化[5-6],并塑造了一系列格局特色的地表景观,为开展景观生态学研究提供了理想舞台。

近几十年来,中国景观生态学家立足景观格局、生态过程、尺度等景观生态学研究的核心科学问题,面向生态系统服务/景观服务、景观可持续性、气候变化等前沿热点领域,综合应用实验监测、模型模拟、GIS和RS分析等技术,针对坡面、小流域、流域、区域等不同尺度,系统探讨了景观格局动态、景观格局与生态过程、生态系统服务等科学命题,取得了系列积极进展,形成了景观生态学研究中的鲜明区域特色。王计平等针对黄土高原地区景观格局演变研究现状和存在的问题进行了系统综述[7],本文通过文献阅读,重点分析了2010年以来黄土高原地区景观生态学研究的现状和特点,探讨未来景观生态学研究的重点方向和发展趋势。

1 研究现状与特点

针对黄土高原地区特点,我国学者基于景观生态学原理和方法,围绕"景观格局演变-驱动机制-水土流失过程-生态系统服务"的研究框架,开展了大量的研究(图1),其研究内容主要包括"景观格局变化及其生态环境效应"、"景观格局与生态过程耦合"以及"生态恢复与区域生态系统服务权衡"等方面,在理论方法和实用研究方面取得了重要进展。

1.1 景观格局变化及其生态环境效应

随着退耕还林/草工程的实施,黄土高原地区土地利用与覆被格局发生了剧烈变化,由此带来了景观格局的变化。识别景观格局变化特征及其生态环境效应成为黄土高原景观生态学研究的重要方面。

1.1.1 景观格局动态变化特征

在研究景观格局动态变化特征方面,遥感影像解译与GIS空间分析成为重要的手段,按照景观格局的分析角度,所开展的工作主要集中于两个方面:(1)从生态恢复角度定量识别了黄土高原植被格局的动态变化特征。从目前研究看,植被格局动态研究涉及到不同的景观类型或生态类型区,如典型羊道景观[8]、水蚀风蚀交错带[9]、三北防护林工程区[10]、典型森林景观[11]等。在我国退耕还林工程的支持下,植被覆盖总体呈显著地上升趋势,在一定程度上揭示了黄土高原植被格局的变化规律,为未来区域内生态环境的改善和社会经济价值的创造提供了参考。(2)从土地利用/覆被变化角度揭示了黄土高原地区景观格局变化的特征。该类研究多集中于小流域尺度,基于不同时期遥感影像解译的土地利用/土地覆被类型图,通过构建土地利用动态

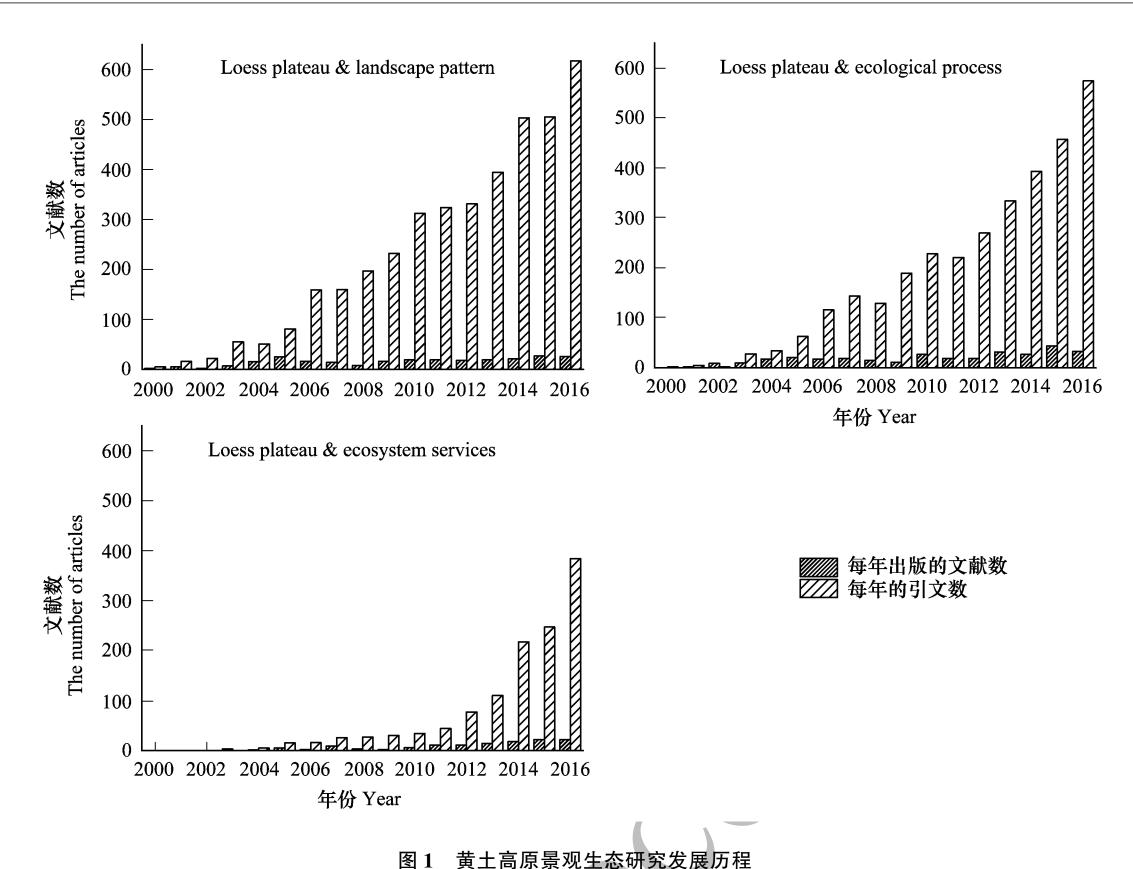


图 1　黄土高原景观生态研究发展历程

Fig.1　The development process of landscape ecology of Loess Plateau

依据 Web of Science 引文数据库,在以"Loess Plateau"为主题的搜索结果中,再分别以"Landscape Pattern"、"Ecological Process"和"Ecosystem Services"为主题检索历年来发表的中英文文章,并对每年的引文数进行统计分析

变化模型和区域生态环境指标等,定量分析不同尺度土地利用/覆被时空变化特征及其驱动机制[12]。研究认为,由于不同的自然因素和人文因素驱动,黄土高原地区土地利用类型转化存在明显的区域差异,但综合来看,农田转化为林地和草地,景观异质性程度有所下降,生态效益逐渐变好[13-15]。在区域尺度,退耕还林(草)政策的实施,也有效增加了黄土高原地区的植被覆盖度,对遏制黄土高原地区生态环境退化发挥了积极的控制作用[16]。此外,景观格局的尺度效应分析,也是景观格局分析的一大特点。其尺度效应分析往往聚焦于伴随着研究粒度的变化,其景观格局分析结果发生什么样的变化趋势[17-18]。

景观格局分析方法主要包括空间统计分析、景观指数分析及格局动态模型模拟等[4]。在黄土高原景观格局变化及其动态分析中,空间统计分析依然是其基本分析方法,往往在景观类型时空变化分析的基础上,探讨其在海拔、坡度、土壤等环境因子上的分布格局特征[19]。而采用景观指数进行格局分析,虽然存在于部分研究文献中[20],但是其能否具有良好的生态学意义,却成为学者们亟待回答的重要问题[21-22]。针对该问题,学者们深入探讨了针对不同生态过程的景观格局表征方法和理论框架,其突出代表是源汇景观理论的提出和基于源、汇过程的景观空间负荷比指数的构建[23-26];同时,基于源汇景观理论和景观空间负荷指数,学者们也针对土壤侵蚀特定生态过程,探讨并提出了"多尺度土壤侵蚀评价指数"等[27-29],来刻画具有生态学意义的景观格局特征。在景观格局动态模拟中,运用景观空间模型研究景观格局变化及其动态特征也是黄土高原地区的一大特点。除了较为常用的 CA-Markov 模型[12]外,已开发和利用的模型也有很多,如 LANDIS 空间直观景观模型,用于模拟森林演替在自然干扰和人为干扰下较大时空尺度上的景观动态变化[11];范泽孟等构建的生态系统过渡带的时空分析模型,可以在大时间尺度上较准确地模拟区域土地利用/土地覆盖的时空变化特征[30]。但是,总体而言,黄土高原格局模拟与预测的研究依旧相对薄弱。

在景观格局变化的研究中,景观格局的驱动机制也往往是研究的主要内容之一。在退耕还林还草政策之

前，区域经济发展和地形地貌特征等共同决定着景观格局的变化动态。然而1999年之后，国家推行的退耕还林(草)等一系列生态重建措施成为区域景观格局变化的主要驱动因素[19]，黄土高原典型流域的土地利用和景观格局随之发生了剧烈的变化[31-33]。其中，耕地面积比例急剧减小，林草地面积比例迅速增加，流域土地利用结构由农牧占绝对主体转变为农、林、牧均等复合[34-35]。此外，随着研究尺度的变化，景观格局变化的驱动机制也有明显的差异[36]。

1.1.2 生态建设与景观格局变化的生态环境效应

经过多年的生态建设和流域综合治理，尤其是退耕还林(草)工程的实施，黄土高原的生态环境有了一定程度的改善，呈显著的恢复态势。有关黄土高原生态建设与景观格局变化的生态环境效应主要集中在3个方面。(1)立地尺度上生态修复效应的定点监测与比较研究。该类研究重点是针对矿区的生态恢复，通过对矿区不同的生态修复模式的定点监测，比较研究不同生态恢复模式带来的生态环境效应。研究发现矿区土地复垦首先会导致生物群落逐渐恢复，土壤质量得到较为明显的改善[37]。(2)区域尺度上生态建设的生态环境效应评价。在区域尺度上，基于大面积的野外调查与遥感影像解译，研究生态建设工程所带来的生态环境效应。研究发现，黄土高原实施的大范围生态建设会带来植被覆盖度的增加，其结果是引起较高的地表蒸散量，降低了白天的地表温度和径流系数[38]。此外，不同退耕年限不同植被恢复模式带来的生态环境效应也有所不同[39-40]。(3)区域植被恢复的可持续性。在植被恢复与景观格局变化过程中，由于植被恢复方式不够合理，引进的物种大多具有高耗水能力且未充分考虑土壤水分的植被承载力，大规模的退耕还林直接导致了土壤深层水分过度消耗，引发了大范围的土壤干层，严重影响了植被恢复的可持续性[41-42]；大片人工恢复植被开始退化，并形成树高只有3—5m的小老头树现象[43]。黄土高原植被恢复与生态系统可持续性遇到了巨大挑战。针对该科学问题，学者们通过耦合地面观测、遥感和生态系统模型等多种研究手段，构建了自然-社会-经济水资源可持续利用耦合框架，建立区域碳水耦合分析方法，提出黄土高原植被恢复应综合考虑区域的产水、耗水和用水的综合需求。研究指出目前黄土高原植被恢复已接近水资源植被承载力的阈值，在未来气候变化条件下，该承载力阈值在383—528 g C m^{-2} a^{-1}间浮动[44]。这一研究成果在区域生态系统碳水耦合分析方法上有所突破，对于指导黄土高原退耕还林还草工程的实施具有重要意义。

1.2 景观格局与生态过程耦合

景观格局与生态过程的耦合作用一直是景观生态学关注的重点内容。在黄土高原地区，景观格局与土壤水分、景观格局与水土流失以及景观格局与过程的耦合模型一直是多年来研究的重点。

1.2.1 景观格局与土壤水分

土壤水分的时空变异是由多重尺度上的土地利用、气象、地形、人为活动等诸多因子综合作用的结果[45]。黄土高原地区土壤水分时空变异性具有一定的尺度效应，并受到土地利用类型(植被)、地形、气象(降水)、土壤等多种因子的综合影响。目前一般研究包括以下几个方面。

(1)景观类型对土壤水分的影响。植被群落影响土壤水分的补给和使用过程，特别是水分的输入过程，不同植被恢复及其空间格局影响土壤水分的分布状况[46]。研究发现，半干旱地区植被类型相同时，地形因素及人为活动成为影响浅层土壤水分含量的重要因子，地上生物量成为决定深层土壤水分空间变异的主导因子[47]；土壤水分与土地利用类型及其结构具有一定的相关性，不同土地利用类型下土壤水分分布状况有所差异，复杂的土地利用结构中深层土壤水分具有较高的空间异质性[48]，其中，农地土壤水分含量最高，其次为荒草地，人工植被(牧草、灌木林、乔木林)土壤水分显著低于农地和荒草地，但不同人工植被之间无显著差异[49-52]。还有研究表明人工植被降低了深层土壤水分的含量和空间异质性，减弱了流域土壤水分的涵养功能，且土壤贮水能力随着植被自然恢复时间增加而降低[53-55]。由此可见，在黄土高原未来的生态修复过程中，如何选择合适的植被类型来维持土壤的水分平衡，仍值得深入的研究和探讨。

(2)景观格局与土壤水分的空间变异。黄土高原地区土壤水分具有一定的空间变异，水平方向上表现出由东南向西北递减的趋势，垂直方向上(0—500cm)表现出先减小后增加的分布特征[56]；流域景观格局对土

壤水分具有明显影响,如耕地面积占 24.3%的李家湾小流域的 2—5m 深度平均土壤水分比完全退耕的剪子岔小流域高出 2.3%[48]。土地利用对区域尺度土壤水分的含量及剖面分布规律也具有显著影响,不同土地利用类型(植被类型)剖面土壤水分整体表现出上层波动剧烈,下层变化较小的特征[49, 57-58]。在整个黄土高原尺度,不同区域总体表现出人工恢复植被的土壤水分低于农田和荒草,在<400mm 和>600mm 降水量的地区不同植被对较深层次水分影响的差异并不明显,而在 400—600mm 降水量地区植被类型对深层土壤水分的影响显著[47]。退耕还林还草不能以单一人工植被为主,应多样化,过度引入人工植被容易使土壤水分枯竭[48]。

(3)景观格局与土壤水分的季节变化。在季节动态上,浅层土壤含水量具有明显的季节性波动变化特征,深层土壤含水量年内变化较小[57]。高晓东从流域、坡面和沟道 3 个尺度分析了黄土丘陵区典型小流域土壤有效水在春、夏、秋 3 个季节的空间变异特征,表明出土壤有效水均呈较强空间变异性,土壤有效水空间变异呈现明显的季节性特征,并且秋季土壤有效水均值最高而空间变异性最低,夏季土壤有效水均值最低但变异系数最大[59]。同时,降水年型对不同植被类型土壤水分的季节变化和剖面垂直剖面变化均有影响,不同的土地利用方式对土壤水分的垂直变化和月动态均产生不同影响[60-61]。

针对黄土高原地区土壤水分空间分布特征及其与环境因素的关系研究,多采用自回归状态空间模拟和经典统计的线性回归模型对不同地区不同深度土壤含水率的分布状况进行模拟,对黄土高原沟壑区坡地不同深度土壤含水率[62]和黄土高原北部草原表层土壤水分空间分布特征与环境因素关系[63]的实际研究表明,状态空间模型的模拟效果均高于线性回归方程,可用于这些区域土壤水分的预测。

1.2.2　景观格局与水土流失

景观格局与水土流失的研究方法主要涉及景观格局分析方法[64],"源-汇"理论[33]、土壤流失方程 RUSLE[65-66]和 ^{137}C 核素示踪技术[67]等。近年来,相关学者运用以上方法分别对黄土高原土壤侵蚀的强度[68-69]、流域土壤侵蚀空间的时空演变[65]、景观格局对流域水土流失过程的影响机制[64]进行了深入的研究,分析景观格局与水土流失的关系,寻找流域水土流失评价的有效方法[70],探讨降低土壤侵蚀发生的途径和措施。经过多年的综合治理,黄土高原景观格局和水土流失方面发生了重要的变化,水土流失控制能力得到显著的提升,生态系统趋于稳定化,生态功能逐渐增强,流域生态环境得到了明显改善[71]。

导致水土流失的原因多种多样,包括地形、降雨、土地利用类型等。坡面形态(坡长、坡形、坡度)对土壤侵蚀具有重要影响[72],坡度和坡长是影响水土流失最重要的因子[73],研究表明,在土地利用类型相同时,土壤侵蚀随着坡度等级的增大而显著增强[66]。雨强和雨量对水蚀的发生具有重要影响,但以雨强的影响更大,并且降雨前期土壤含水量与径流量和侵蚀量呈显著正相关;降雨与径流之间的关系,在很大程度上也受到地表条件的影响,如植物种类、土壤结皮、地表覆盖、前期土壤水分、植被缓冲带和特殊的位置条件等[74-75]。在生态恢复背景下,土地利用格局的相对状况与水沙时空变化关系密切,在退耕还林(草)工程驱动下,黄土丘陵沟壑区流域耕地、未利用地向林、草地转移,减水减沙效益明显,水土流失状况得到了明显改善[76]。此外,植被类型与配置模式也在不同程度上影响水土流失效应,具有多层结构的植被群落比单层植被更能保护土壤,减轻侵蚀强度[77];灌木林作为景观基质对径流泥沙也有一定控制作用,并且不同植株及其微观格局遏制地表径流的能力不同,如,有沙棘覆盖的小区地表径流系数最低,且以沙棘位于坡面下部位的水土保持效果最好[74-75]。

CA-Markov 模型是模拟水土流失过程较为常用的方法,主要模拟和预测土壤侵蚀状况及空间分布信息。此外,WATEM/SEDEM 是一种空间分布土壤侵蚀模型,包括土壤侵蚀评估、沉积物运输产能计算和泥沙演算 3 个方面,可以用来模拟土壤侵蚀及其对土地利用变化的响应[78]。也有少数研究采用 BP 神经网络进行黄土高原小流域侵蚀预测[79],完善了小流域侵蚀产沙的分析方法。

1.2.3　景观格局与生态过程耦合

景观格局与生态过程耦合常用的方法是直接观测、系统分析与模型模拟[80-81]。基于直接观测的格局过程耦合研究主要包括:(1)在样点尺度上,通过定位观测与控制实验对景观功能和过程进行机理分析;在景观

尺度上,采用样带观测和实验并基于 GIS 和大范围观测与调查数据,利用空间模型进行景观动态模拟;在大区域尺度上,景观格局与生态过程的耦合涉及多重因素,则需要运用遥感技术、运用系统分析和模拟的方法去实现多手段和多时空尺度的数据集成。(2)基于模型的景观格局与过程耦合研究包括基于土壤侵蚀过程的景观指数研究、基于景观格局变化的固碳效应研究以及黄土高原水沙变化的效应评价等。如,常用的格局与过程的耦合模型是 SWAT 分布式水文模型,主要用于模拟流域的水沙变化、水土流失空间格局等,阐述流域水文生态过程对土地利用格局演变的响应机制[82]。总体而言,对景观格局与生态过程相互作用关系与机理的深刻理解是耦合研究的基础,依据观测与模型手段深入分析格局-过程关系的关键因子与作用机理,通过构建耦合模型等手段开展耦合研究是景观生态学未来的重要方向。傅伯杰先生基于在黄土高原开展的长期研究,系统总结了格局与过程的耦合案例实践,形成为了地理学的综合研究途径与方法,并提出格局与过程的耦合研究要加强野外长期观测和综合调查[81]。此外,由于不同尺度景观格局与生态过程的关系往往具有显著的差异,因此在格局-过程耦合研究中,也需要进一步加强景观格局与生态过程耦合关系的尺度效应与尺度转换研究。

1.3 区域生态恢复与生态系统服务权衡

1.3.1 区域景观格局变化与生态系统服务

从 1980s 年代以来,一系列生态恢复措施尤其是 1999 年后退耕还林还草工程的实施,是黄土高原生态系统服务改善的主要驱动因素[83]。许多学者在黄土高原开展了大量的研究,通过发展区域性关键生态系统服务的定量评估方法,揭示了不同尺度生态系统功能对生态系统恢复的响应。如,分别在样地尺度、小流域尺度和区域尺度揭示了水源涵养功能、固碳功能[83-86]以及土壤保持功能[71]等对生态系统恢复的响应关系。研究发现,黄土高原的生态系统服务提高主要依赖于农田向草地和林地、草地向林地的转换[87];不同生态系统服务的变化量存在明显的区域差异,不同时期和植被类型的恢复对各种生态系统服务的贡献也存在差异;其中,土壤水分对植被恢复的响应具有明显的空间差异性,自然恢复的草本群落土壤入渗性能得到改善,使净流量降低,水源涵养能力提高;随着退耕年限增加,黄土高原地区的固碳效率和土壤保持服务能力会得到显著提升。这些研究结果对于黄土高原发展空间明晰的生态系统管理具有重要的指导意义。

1.3.2 生态系统服务权衡

权衡分析有助于获得对多种服务之间的交互关系、变化趋势和驱动力的深入认识,而这种综合的分析对于整体性的生态系统管理也是至关重要的[88]。目前权衡研究多是关于概念的探讨,缺乏量化方法和实际的评价[89]。主要借助均方根偏差(RMSD)、二元相关分析、以及竞合系数等方法对黄土高原区域和典型子流域多种生态系统服务间的权衡关系进行了量化分析。研究发现,生态系统服务相互关系取决于服务的种类,并具有尺度依赖性。例如,调节服务之间通常是协同关系,而调节服务与供给服务之间通常是权衡关系[90]。在整个黄土高原上,泥沙输出与产水量呈显著正相关,碳固定与产水量呈显著负相关;在延河流域尺度上,泥沙截留与水源涵养呈正相关[91]。这可能是因为,在较小空间尺度上,自然因素是主要驱动因素;随着尺度增大,人为因素的作用逐渐显现出来。综合考虑社会经济因素,可以估算具有权衡关系的两种服务的承载力阈值[44]。

定量辨识不同生态服务功能随生态恢复而表现出的竞争、协同关系及其程度是生态系统服务研究的关键科学问题之一。目前国际上生态系统服务空间评估的工具很多,应用最多的是 InVEST 模型,为用户提供了若干生态系统服务定量化和价值化的模型,缺点是没有包括权衡分析和空间优化等方法,也没有提供运行结果的可视化表达[92]。基于以上背景,建立了不同尺度生态服务功能权衡分析的方法,如,生态系统过程-服务-管理动态链接与综合集成的理论模型[93],该模型解析了不同尺度联系生态系统与社会系统的生态过程特征,明确了通过生态系统管理调控与优化多种生态服务功能关系的途径,为区域生态服务功能权衡提供了理论框架;此外,区域生态系统服务空间评估与优化工具(Spatial Assessment and Optimization Tool for Regional Ecosystem Services, SAORES)则将 GIS、生态系统模型和多目标优化算法有机结合,提供了一个数据、模型、空

间制图、统计分析集于一体的集成模拟与分析环境[94]。目前,这一系统已在黄土高原多个小流域成功应用,为探索生态修复的空间优化管理提供了决策支持工具。

2 研究展望

2.1 目前研究中存在的问题

纵观目前在黄土高原景观生态方面的研究,还存在以下问题和不足:

(1)目前的研究多侧重于典型区,从整个黄土高原地区出发,进行深入比较研究相对不多;区域植被恢复与景观格局变化定量关系及其数学机理模型研究相对并不多见。有关黄土高原植被恢复与景观格局动态的研究,相关学者开展了大量的工作,但这些工作多将重点放在黄土高原的典型流域区,对于不同区域之间的对比以及整个黄土高原尺度上的全面系统研究尚有进一步深化的空间。此外,在定量分析以植被恢复为主要内容的生态恢复过程与景观格局变化之间相互联系与反馈机理方面,有效的数学模型也不多见。

(2)景观格局与生态过程的耦合研究取得了积极进展,诸如景观格局与土壤水分、水土流失、生物量、固碳效应等方面。然而,对耦合关系的研究尽管采取了定量观测与分析的方法,但是其内在机理分析尚显得不够,景观格局与生态过程的耦合模型有进一步发展的空间[76],区域差异的对比研究有待于进一步加强。

(3)针对生态恢复和生态系统服务间的作用与响应研究,多集中在黄土高原生态修复过程对土壤保持、水文调节以及碳固定等生态系统服务的影响,系统性和整体性的分析有待于进一步加强;在生态服务功能权衡方面,有关生态服务权衡的方法和模型尚处于探索与起步阶段,生态系统服务权衡与协同分析研究仍以定性分析较多,定量化的实证性研究并不多见[89, 92];与此同时,虽然基于不同类型模型开展了多种生态服务之间的权衡研究,但有待于加强从机理上开展不同模型之间的比较研究。

2.2 展望

(1)在整个黄土高原尺度上加强区域尺度的综合研究,开展不同地区之间的比较研究,在整个区域尺度上形成系统的研究体系,探讨区域内植被恢复与景观格局变化的相互关系,深化景观格局变化的形成机理和演变机制,发展区域景观格局变化的机理模型,定量分析生态恢复与景观格局变化之间的相互关系与反馈机理。

(2)进一步发展格局和过程的定量识别与研究方法,在景观格局与生态过程的耦合研究时,继续加强野外长期观测和综合调查,将地面观测与遥感紧密结合,探索格局与多过程的耦合效应及其权衡比较分析。此外,由于格局与过程耦合具有空间异质性,应将不同尺度的研究进行同化和综合,并在此基础上开发格局-过程耦合模型,对不同时空尺度景观格局和生态过程进行模拟和预测。

(3)加强生态系统过程与服务的研究,以及不同区域和尺度下不同生态系统内生态系统服务之间关系的研究,从而为区域生态系统服务的权衡和优化管理提供基础,建立基于机理的生态服务权衡综合性模型,进一步实现生态系统服务的集成;同时,开展相应的实证性研究和不同模型之间的比较研究,优化适宜的生态服务权衡模型,为深入探讨区域生态系统服务的权衡与协同关系提供新途径。

(4)如何开展科学的人类活动调控与提高景观管理效率也将是未来黄土高原地区景观生态学研究的重要工作之一。纵观黄土高原景观的历史变迁,人类活动始终强烈影响着黄土高原地区的景观格局演变,是该地区环境演变的主导因素之一。虽然退耕还林还草工程促进了黄土高原植被覆盖的增加,但在城市化和工业化进程不断加速的时代背景下,过度放牧、开垦以及乱采乱伐等现象在一定程度上导致了植被覆盖度的降低。由此可见,人类活动对黄土高原景观变化的建设和破坏作用同时并存,如何实现正影响大于负影响,不仅要继续推进各项生态工程建设的实施,还需加强对人类活动的合理调控,进行有效的景观管理,从而实现黄土高原地区景观的可持续发展。

参考文献(References):

[1] 陈利顶, 李秀珍, 傅伯杰, 肖笃宁, 赵文武. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. 生态学报, 2014, 34(12): 3129-3141.

[2] 赵文武, 王亚萍. 1981-2015 年我国大陆地区景观生态学研究文献分析. 生态学报, 2016, 36(23): 7886-7896.
[3] 徐勇, Sidle R C. 黄土丘陵区燕沟流域土地利用变化与优化调控. 地理学报, 2001, 56(6): 657-666.
[4] 傅伯杰, 赵文武, 张秋菊, 刘宇. 黄土高原景观格局变化与土壤侵蚀. 北京: 科学出版社, 2014.
[5] Chen L D, Wang J, Fu B J, Qiu Y. Land-use change in a small catchment of northern Loess Plateau, China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001, 86(2): 163-172.
[6] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001.
[7] 王计平, 陈利顶, 汪亚峰. 黄土高原地区景观格局演变研究现状、问题与未来发展. 地理科学进展, 2010, 29(5): 515-522.
[8] 倪晓峰. 半干旱黄土高原地区羊道景观的植被格局和结构研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
[9] 孙艳萍, 张晓萍, 徐金鹏, 马曈宇, 马芹, 雷泳南. 黄土高原水蚀风蚀交错带植被覆盖时空演变分析. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(2): 143-150, 156-156.
[10] 陈赛赛, 孙艳玲, 杨艳丽, 王中良. 三北防护林工程区植被景观格局变化分析. 干旱区资源与环境, 2015, (12): 85-90
[11] 高小莉, 赵鹏祥, 郝红科, 杨延征. 基于 LANDIS-II 的陕西黄龙山森林景观演变动态模拟. 生态学报, 2015, 35(2): 254-262.
[12] 郭斌, 张莉, 文雯, 任志远. 基于 CA-Markov 模型的黄土高原南部地区土地利用动态模拟. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12): 14-18.
[13] 侯志华, 马义娟. 黄土高原汾河流域地表景观演变特征研究. 水土保持研究, 2013, 20(2): 92-97,311.
[14] Li J C, Zhao Y F, Liu H X, Su Z Z. Changes in the area and pattern of farmland in China's eastern Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): 149-153.
[15] Fan Z M, Li J, Yue T X. Land-cover changes of biome transition zones in Loess Plateau of China. Ecological Modelling, 2013, 252: 129-140.
[16] 钟莉娜, 赵文武. 基于 NDVI 的黄土高原植被覆盖变化特征分析. 中国水土保持科学, 2013, 11(5): 57-62.
[17] 赵文武, 朱婧. 我国景观格局演变尺度效应研究进展. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(S): 287-291.
[18] 赵文武, 傅伯杰, 陈利顶. 景观指数的粒度变化效应. 第四纪研究, 2003, 23(3): 326-333.
[19] 钟莉娜, 赵文武, 吕一河, 刘源鑫. 黄土丘陵沟壑区景观格局演变特征——以陕西省延安市为例. 生态学报, 2014, 34(12): 3368-3377.
[20] Gao L B, Yun L, Ren Y, Cui Z W, Bi H X. Spatial and Temporal Change of Landscape Pattern in the Hilly-Gully Region of Loess Plateau. Procedia Environmental Sciences, 2011, 8: 103-111.
[21] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰. 景观生态学中的格局分析:现状、困境与未来. 生态学报, 2008, 28(11): 5521-5531.
[22] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰. 景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性. 生态学报, 2011, 31(1): 267-275.
[23] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 巩杰. 基于"源-汇"生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413.
[24] Chen L D, Fu B J, Zhao W W. Source-sink landscape theory and its ecological significance. Frontiers of Biology in China, 2008, 3(2): 131-136.
[25] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. "源""汇"景观理论及其生态学意义. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449.
[26] Fu B J, Pan N Q. Integrated studies of physical geography in China: Review and prospects. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(7): 771-790.
[27] Zhao W W, Fu B J, Chen L D. A comparison between soil loss evaluation index and the C-factor of RUSLE: a case study in the Loess Plateau of China. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2739-2748.
[28] 赵文武, 傅伯杰, 郭旭东. 多尺度土壤侵蚀评价指数的技术与方法. 地理科学进展, 2008, 27(2): 47-52.
[29] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, Lü Y H, Wang D. A multiscale soil loss evaluation index. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(4): 448-456.
[30] 范泽孟, 李婧, 岳天祥. 黄土高原生态系统过渡带土地覆盖的时空变化分析. 自然资源学报, 2013, 28(3): 426-436.
[31] 易扬, 信忠保, 覃云斌, 肖玉玲. 生态植被建设对黄土高原农林复合流域景观格局的影响. 生态学报, 2013, 33(19): 6277-6286.
[32] 张庆印, 樊军, 张晓萍. 退耕还林(草)对农牧交错区小流域景观格局的影响——以神木县六道沟小流域为例. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 97-103.
[33] 李海防, 卫伟, 陈瑾, 李旭春, 张佰林. 定西关川河流域退耕还林还草对景观格局演变的影响. 干旱区研究, 2014, 31(3): 410-415.
[34] 秦伟, 朱清科, 左长清, 单志杰, 邝高明. 大规模植被重建背景下的黄土高原流域土地利用时空演变. 水土保持学报, 2014, 28(5): 43-50.
[35] 王计平, 程复, 汪亚峰, 陈洪波, 于强. 生态恢复背景下无定河流域土地利用时空变化. 水土保持通报, 2014, 34(5): 237-243.
[36] Zhong L N, Zhao W W, Zhang Z F, Fang X N. Analysis of Multi-Scale Changes in Arable Land and Scale Effects of the Driving Factors in the Loess Areas in Northern Shaanxi, China. Sustainability, 2014, 6(4): 1747-1760.
[37] 任慧君, 李素萃, 刘永兵. 生态脆弱区露天煤矿生态修复效应研究. 煤炭工程, 2016, 48(2): 127-130.
[38] Li S, Liang W, Fu B J, Lü Y H, Fu S Y, Wang S, Su H M. Vegetation changes in recent large-scale ecological restoration projects and subsequent impact on water resources in China's Loess Plateau. Science of the Total Environment, 2016, 569-570: 1032-1039.
[39] 李裕元, 邵明安, 陈洪松, 霍竹, 郑纪勇. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响. 生态学报, 2010, 30(16): 4306-4316.

[40] 张笑培, 杨改河, 王和洲, 宗洁, 杨慎骄. 黄土沟壑区不同植被恢复群落特征及多样性研究. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 22-25, 219-219.

[41] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology, 2010, 381(1/2): 9-17.

[42] Jia Y H, Shao M A. Dynamics of deep soil moisture in response to vegetational restoration on the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology, 2014, 519: 523-531.

[43] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. Geoderma, 2008, 143(1/2): 91-100.

[44] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China′s Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.

[45] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 张希来, 孟庆华. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系. 生态学杂志, 2007, 26(1): 100-107.

[46] Wang S, Fu B J, Gao G Y, Liu Y, Zhou J. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. Catena, 2013, 101: 122-128.

[47] Yang L, Chen L D, Wei W. Effects of vegetation restoration on the spatial distribution of soil moisture at the hillslope scale in semi-arid regions. Catena, 2015, 124: 138-146.

[48] Yang L, Chen L D, Wei W, Yu Y, Zhang H D. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions. Journal of Hydrology, 2014, 513: 314-321.

[49] 王晓军, 武江涛, 王兵, 温奋翔. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异. 生态学杂志, 2015, 34(9): 2568-2575.

[50] 王亚飞, 樊军, 贾沐霖. 黄土高原水蚀风蚀交错区植被恢复中土壤水分变化. 草地学报, 2016, 24(2): 344-350.

[51] Yang L, Wei W, Chen L D, Mo B. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2012, 475: 111-122.

[52] Yang L, Wei W, Chen L D, Chen W L, Wang J L. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China. Catena, 2014, 115: 123-133.

[53] Zhang Y W, Deng L, Yan W M, Shangguan Z P. Interaction of soil water storage dynamics and long-term natural vegetation succession on the Loess Plateau, China. Catena, 2016, 137: 52-60.

[54] Zhang Y W, Shangguan Z P. The change of soil water storage in three land use types after 10 years on the Loess Plateau. Catena, 2016, 147: 87-95.

[55] Jian S Q, Zhao C Y, Fang S M, Yu K. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 206: 85-96.

[56] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性. 水科学进展, 2012, 23(3): 310-316

[57] 缪凌, 董建国, 汪有科, 蒋观滔. 黄土丘陵区不同土地利用类型下的深层土壤水分变化特征. 水土保持研究, 2016, 23(2): 13-18.

[58] You W Z, Zeng D H, Liu M G, Yun L L, Ye Y H, Zhang Y. Spatial and temporal variations of soil moisture in three types of agroforestry boundaries in the Loess Plateau,China. Journal of Forestry Research, 2010, 21(4): 415-422.

[59] 高晓东, 吴普特, 张宝庆, 黄俊, 赵西宁. 黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异及其季节性特征. 土壤学报, 2015, 52(1): 57-67.

[60] 朱乐天, 焦峰, 刘源鑫, 贺国鑫. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分时空变异特征. 水土保持研究, 2011, 18(6): 115-118.

[61] 李巍, 郝明德, 王学春. 黄土高原沟壑区不同种植系统土壤水分消耗和恢复. 农业工程学报, 2010, 26(3): 99-105.

[62] 段良霞, 黄明斌, 张洛丹, 索立柱, 张永坤. 黄土高原沟壑区坡地土壤水分状态空间模拟. 水科学进展, 2015, 26(5): 649-659.

[63] 贾小旭, 邵明安, 魏孝荣, 李学章. 黄土高原北部草地表层土壤水分状态空间模拟. 农业工程学报, 2010, 26(10): 38-44.

[64] 王计平, 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 黄志霖. 黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响——景观水平与多尺度比较. 生态学报, 2011, 31(19): 5531-5541.

[65] 庞国伟, 谢红霞, 李锐, 杨勤科. 70 多年来纸坊沟小流域土壤侵蚀演变过程. 中国水土保持科学, 2012, 10(3): 1-8.

[66] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, Zhai J. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. Catena, 2014, 121: 151-163.

[67] 汪亚峰, 傅伯杰, 陈利顶, 吕一河, 罗春燕. 黄土丘陵小流域土地利用变化的土壤侵蚀效应: 基于^{137}Cs 示踪的定量评价. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1571-1576.

[68] 刘佳鑫, 刘普灵, 刘栋, 张宁宁. 黄土丘陵区典型峁坡土壤侵蚀空间分异特征. 水土保持通报, 2014, 34(4): 1-4,10-10.

[69] 王娟, 卓静. 基于 RS 和 GIS 的陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀定量评价. 水土保持通报, 2015, 35(1): 220-223,229-229.

[70] 李海防, 卫伟, 陈瑾, 李旭春, 张佰林. 基于"源""汇"景观指数的定西关川河流域土壤水蚀研究. 生态学报, 2013, 33(14): 4460-4467.

[71] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, He C S, Zeng Y, Wu B F. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. Ecological Complexity, 2011, 8(4): 284-293.

[72] 陈利顶, 贾福岩, 汪亚峰. 黄土丘陵区坡面形态和植被组合的土壤侵蚀效应研究. 地理科学, 2015, 35(9): 1176-1182.

[73] Chen N, Ma T Y, Zhang X P. Responses of soil erosion processes to land cover changes in the Loess Plateau of China: A case study on the Beiluo River basin. Catena, 2016, 136: 118-127.

[74] Wei W, Jia F Y, Yang L, Chen L D, Zhang H D, Yu Y. Effects of surficial condition and rainfall intensity on runoff in a loess hilly area, China. Journal of Hydrology, 2014, 513: 115-126.

[75] 卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾. 黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应. 环境科学, 2012, 33(8): 2674-2679.

[76] 陈攀攀, 常宏涛, 毕华兴, 陈智汉. 黄土高塬沟壑区典型小流域土地利用变化及其对水土流失的影响. 中国水土保持科学, 2011, 9(2): 57-63.

[77] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 刘宇, 王帅, 周继. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(1): 12-22.

[78] Feng X M, Wang Y F, Chen L D, Fu B J, Bai G S. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. Geomorphology, 2010, 118(3/4): 239-248.

[79] 赵明伟, 汤国安, 李发源, 袁宝印, 陆中臣. 基于 BP 神经网络的陕北黄土高原侵蚀产沙影响因子显著性研究. 水土保持通报, 2012, 32(1): 5-9,226-226.

[80] 傅伯杰, 徐延达, 吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法. 地球科学进展, 2010, 25(7): 673-681.

[81] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法:格局与过程耦合. 地理学报, 2014, 69(8): 1052-1059.

[82] 卢爱刚, 索安宁, 张镭. 基于 SWAT 模型的黄土高原典型区水土流失格局模拟评价. 水土保持研究, 2011, 18(2): 57-61,65-65.

[83] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China′s Loess Plateau. Scientific Reports, 2013, 3: 2846.

[84] Wang Y F, Fu B J, Lü Y H, Chen L D. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China. Catena, 2011, 85(1): 58-66.

[85] Lü N, Liski J, Chang R Y, Akujärvi A, Wu X, Jin T T, Wang Y F, Fu B J. Soil organic carbon dynamics of black locust plantations in the middle Loess Plateau area of China. Biogeosciences, 2013, 10(11): 7053-7063.

[86] Chang R Y, Fu B J, Liu G H, Wang S, Yao X L. The effects of afforestation on soil organic and inorganic carbon: A case study of the Loess Plateau of China. Catena, 2012, 95: 145-152.

[87] 张立伟, 傅伯杰, 吕一河, 董治宝, 李英杰, 曾源, 吴炳方. 基于综合指标法的中国生态系统服务保护有效性评价研究. 地理学报, 2016, 71(5): 768-780.

[88] Maskell L C, Crowe A, Dunbar M J, Emmett B, Henrys P, Keith A M, Norton L R, Scholefield P, Clark D B, Simpson I C, Smart S M, Clough Y. Exploring the ecological constraints to multiple ecosystem service delivery and biodiversity. Journal of Applied Ecology, 2013, 50(3): 561-571.

[89] Bradford J B, D′Amato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management. Frontiers in Ecology and the Environment, 2012, 10(4): 210-216.

[90] Jia X Q, Fu B J, Feng X M, Hou G H, Liu Y, Wang X F. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China. Ecological Indicators, 2014, 43: 103-113.

[91] Su C H, Fu B J, Wei Y P, Lü Y H, Liu G H, Wang D L, Mao K B, Feng X M. Ecosystem management based on ecosystem services and human activities: a case study in the Yanhe watershed. Sustainability Science, 2012, 7(1): 17-32.

[92] Seppelt R, Lautenbach S, Volk M. Identifying trade-offs between ecosystem services, land use, and biodiversity: a plea for combining scenario analysis and optimization on different spatial scales. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(5): 458-463.

[93] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. 资源科学, 2016, 38(1): 1-9.

[94] Hu H T, Fu B J, Lü Y H, Zheng Z M. SAORES: a spatially explicit assessment and optimization tool for regional ecosystem services. Landscape Ecology, 2015, 30(3): 547-560.